



**BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG**

# Deckblatt

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev.		Seite: I
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN		Stand: 11.04.2017
9A	34216000	GH	EQ	0002	00		

**Titel der Unterlage:**  
**STELLUNGNAHME ZUM MÖGLICHEN EINFLUSS VON ÄNDERUNGEN DER MINERALOGISCHEN  
 ZUSAMMENSETZUNG EINES AUSGANGSSTOFFES BEI DER HERSTELLUNG AUF DIE  
 BAUSTOFFEIGENSCHAFTEN VON SOREL BETON A1**

**Ersteller:**  
 TU-BA-Freiberg

**Stempelfeld:**

<b>bergrechtlich verantwortliche Person:</b>  Datum und Unterschrift	<b>atomrechtlich verantwortliche Person:</b>  Datum und Unterschrift	<b>Projektleitung:</b>  Datum und Unterschrift	<b>Freigabe zur Anwendung:</b>  Datum und Unterschrift
--	--	--	--

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung der BGE.



Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: II
NAAN	NNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	34216000	GH	EQ	0002	00	Stand: 11.04.2017

Titel der Unterlage:

STELLUNGNAHME ZUM MÖGLICHEN EINFLUSS VON ÄNDERUNGEN DER MINERALOGISCHEN ZUSAMMENSETZUNG EINES AUSGANGSSTOFFES BEI DER HERSTELLUNG AUF DIE BAUSTOFFEIGENSCHAFTEN VON SORELBETON A1

Rev.	Rev.-Stand Datum	UVST	Prüfer	Rev. Seite	Kat.*	Erläuterung der Revision

\*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur  
Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung  
Kategorie S = substantielle Änderung  
mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden



## Stellungnahme

### **zum möglichen Einfluss von Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung eines Ausgangstoffes bei der Herstellung auf die Baustoffeigenschaften von Sorelbeton A1**

#### **Erläuterung**

Im Grubengebäude der Asse II wird u.a. der Baustoff A1 (11,3% MgO, 25,0% MgCl<sub>2</sub>-Lösung und als Zuschlag 63,7% Steinsalzgrus (alle %-Angaben beziehen sich auf Masse%)) eingesetzt. Neben den Anforderungen an das MgO und die MgCl<sub>2</sub>-Lösung bestehen auch Anforderungen an die Zusammensetzung des Salzgrus:

- Eigensalz: Halit > 95%, Nebengemengteile < 5% (Zulässige Nebengemengteile: Anhydrit < 5%, Carnallit < 1%, Hämatit < 1%)
- Fremdsalz: 98% NaCl, 1,8% Anhydrit, 0,1% Carnallit, 0,1% Hämatit.

Bei der Untersuchung von Eigensalzproben wurden neben den oben genannten Nebengemengteilen (u.U. ca. 9%) auch Polyhalitanteile bis 6,3% festgestellt, wodurch sich gleichzeitig der NaCl-Anteil bis auf ca. 84% verringerte. Da der Baustoff A1 zur Errichtung von Strömungsbarrieren (hydraulische und mechanische Anforderungen) eingesetzt wird, stellt sich die Frage, ob eine solche Abweichung in der Zusammensetzung des Salzgrus Auswirkungen auf die Eigenschaften des Baustoffes (chemische Stabilität) und damit auf die Bauwerkseigenschaften haben kann.

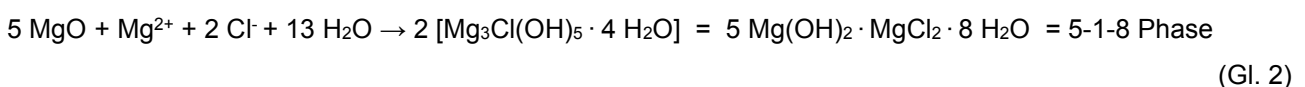
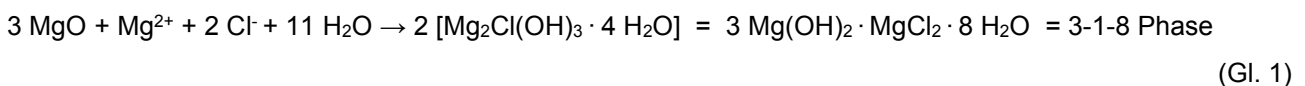
## Bewertung

Polyhalit ( $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) stellt eine Gleichgewichtsphase im hexären System der ozeanischen Salze dar und wird daher auch in den Steinsalzablagerungen des Zechsteins in geringen Anteilen neben der Hauptkomponente Halit sowie Nebenbestandteilen, wie Sylvin, Anhydrit, Kieserit oder Carnallit vorgefunden /1/.

Die Ermittlung der Phasenanteile von Steinsalzproben kann qualitativ mittels Röntgenbeugung (Pulverdiffraktometrie) auf Grundlage der unterschiedlichen Kristallstrukturen der einzelnen Mineralphasen erfolgen. Eine anschließende quantitative Bestimmung aller bekannten, enthaltenen Phasen ist über nasschemische Analysenmethoden möglich (Auflösung der Salzprobe in Wasser, Bestimmung der Ionengehalte (volumetrisch, gravimetrisch, spektroskopisch)). Bei dieser Art der Quantifizierung sollte eine Genauigkeit im 1%-Bereich für die Einzelphasenanteile erreicht werden. Die Möglichkeit zur Phasenquantifizierung besteht auch mittels Röntgenpulverdiffraktometrie (Rietveld-Methode). Jedoch ist hier aufgrund zahlreicher Einflüsse auf das Quantifizierungsergebnis (Probenpräparation, Kristallinität, Korngröße, Quelle der Strukturdaten, Textureffekte, Gerätefunktion, Handhabung der Auswertesoftware) mit einer Ungenauigkeit von bis zu 5% zu rechnen.

Für die Beantwortung der Frage, ob ein Polyhalit-Anteil im Steinsalzgrus-Zuschlag des A1-Sorelbetons Auswirkungen auf die Baustoffeigenschaften haben kann, ist die Bindemittelphasenbildung beim Abbinden in Gegenwart von Polyhalit bzw. der gelösten Komponenten des Polyhalits zu betrachten, da die Eigenschaftsentwicklung des Magnesiabaustoffs von der Art und Weise der Bindemittelphasenbildung bestimmt wird /2/.

Aus den Rezepturkomponenten Magnesiumoxid und der Anmischlösung bildet sich in Abhängigkeit vom MgO-Lösungs-Verhältnis entsprechend Gl. 1 und 2 der eigenschafts-bestimmende Bindemittelphasenbestand aus.



Bei der 3-1-8 Phase handelt es sich um die in Gegenwart von Gleichgewichtslösung thermodynamisch stabile Phase. Die 5-1-8 stellt eine dahingehend metastabile Phase dar, was bedeutet, dass bei einem sekundären Lösungszutritt (potentielle Zutrittslösung im Gleichgewicht mit umliegenden Salzgestein (NaCl gesättigte  $\text{MgCl}_2$ -haltige Lösung) oder auch technische  $\text{MgCl}_2$ -Lösung (Gegenflutungslösung) zum Baustoff/Bauwerk sich diese Phase in die 3-1-8 Phase umwandeln kann.

Die A1-Rezeptur enthält bei genauester Rezeptureinhaltung nach dem Abbinden keine Porenlösung im entstandenen Baustoffgefüge mehr. Das MgO reagiert mit den Magnesium- und Chlorid-Ionen sowie dem Wasser der Anmischlösung unter Bildung der 3-1-8 Bindemittelphase. Für deren stöchiometrische Bildung aus MgO und MgCl<sub>2</sub>-Lösung bedarf es dem ausgewiesenen MgO-Anmischlösungs-Verhältnis (Tab. 1) und einer Anmischlösungskonzentration von 5,046 MgCl<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>O. Ist diese Konzentration etwas höher (5,44 molal, Tab. 3, rechte Spalte), kristallisiert mit dem Lösungsverbrauch durch die Bindemittelphasenbildung etwas Bischofit im Gefüge aus. Generell liegt die Zusammensetzung der Anmischlösung im Rahmen des ausgewiesenen Schwankungsbereiches nahe der Sättigungskonzentration an Bischofit (MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O), Kieserit (MgSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) bzw. Hexahydrat (MgSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O) (Abb. 1) sowie Halit (NaCl), Anhydrit (CaSO<sub>4</sub>) und Carnallit (KCl·MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O). Die Gehalte an Natrium-, Kalium-, Calcium- und Sulfat-Ionen in der Anmischlösung führen daher mit dem Verbrauch der Anmischlösung zur Kristallisation dieser Mineralphasen im sich ausbildenden Porenraum des A1-Sorelbetons. Die möglichen Anteile liegen jedoch nur im 1%-Bereich bezogen auf die gesamte Bauwerksmasse und somit an der Nachweisgrenze für die einzelnen Phasen selbst.

Im Rahmen der realisierbaren Rezepturschwankungsbereite von 3% bei der großtechnischen Verarbeitung der A1-Rezeptur entsteht im Fall eines nach oben hin abweichenden MgO-Gehaltes ein Gemisch aus 3-1-8 und 5-1-8 Phase (maximal 50% 5-1-8 Phase). Im Fall eines nach unten hin abweichenden MgO-Gehaltes entsteht nur die 3-1-8 Phase mit einem geringfügig verbleibenden Anteil an Porenlösung im entstanden Baustoffgefüge.

**Tabelle 1:** Rezepturbestandteile des A1-Sorelbaustoffs /3/.

A1-Rezepturkomponenten		Anteil in Masse%
Bindemittel	MgO	11,3
Zuschlagstoff	NaCl	63,7
Anmischlösung	MgCl <sub>2</sub> - Lösung	25,0

**Tabelle 2:** Zusammensetzung der A1-Anmischlösung /3/.

Komponenten	Konzentrationsbereich der Anmischlösung der A1-Rezeptur
	[Masse%]
<b>MgCl<sub>2</sub></b>	<b>28,6 – 31,6</b>
MgSO <sub>4</sub>	2,3 – 2,5
CaSO <sub>4</sub>	0,07 – 0,1
KCl	0,1 – 0,11
NaCl	0,3 – 0,36
Dichte bei 20°C	1,32 g/L

**Tabelle 3:** Molaler Zusammensetzungbereich der A1-Anmischlösung; Vergleich der Daten in Tab. 2 /3/ mit der im Zeitraum von 2010 bis 2016 auf der Schachanlage Asse II eingesetzten Anmischlösung /4/.

Ionen	Konzentrationsbereich der Anmischlösung der A1-Rezeptur	
	Daten aus Tab. 2 /3/ in molale Ionenkonzentrationen umgerechnet	Analysendaten des Asse GmbH-Labors, Zeitraum 2010 bis 2016 /4/
	mol/kg H <sub>2</sub> O	
Mg <sup>2+</sup>	4,655 - 5,398	5,44 ± 0,5
Cl <sup>-</sup>	8,848 - 10,277	10,4 ± 1,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,286 - 0,329	0,26 ± 0,05
Na <sup>+</sup>	0,075 - 0,094	0,105 ± 0,015
K <sup>+</sup>	0,020 - 0,023	0,030 ± 0,015
Ca <sup>2+</sup>	0,008 - 0,011	0,0011 ± 0,0004

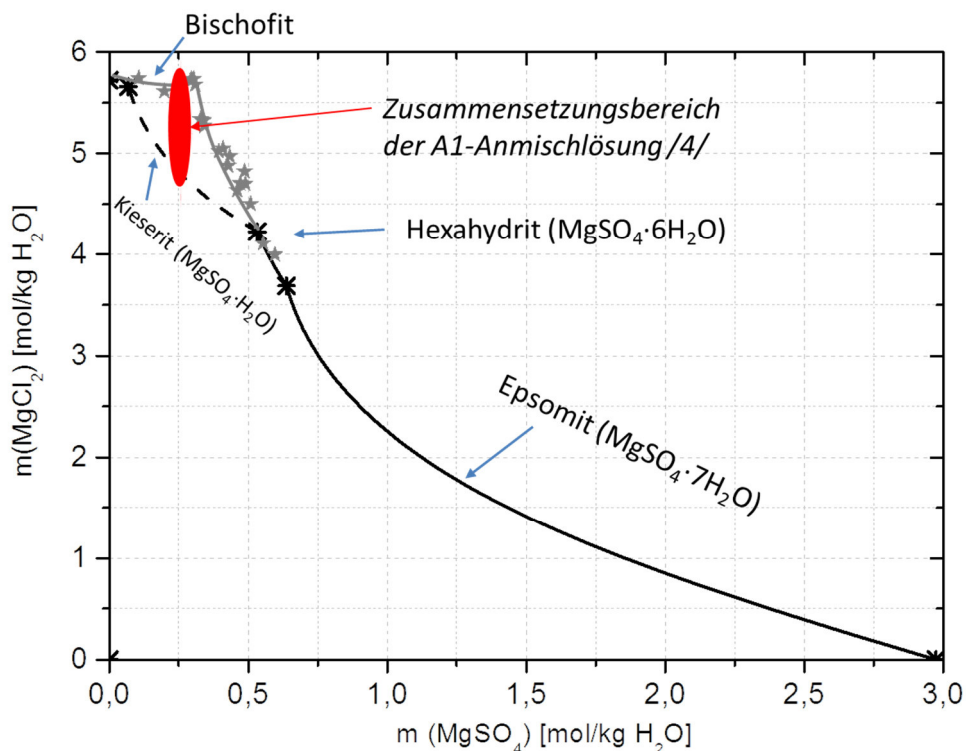


Abb. 1: Zusammensetzungsbereich der A1-Anmischlösung (rotes Feld), dargestellt im Löslichkeitsdiagramm des ternären Systems MgCl<sub>2</sub> - MgSO<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>O bei 25°C /5/.

Im Zuge der Rezepturverarbeitung sättigt sich die Anmischlösung durch Kontakt mit dem Steinsalzzuschlag abschließend mit NaCl. Dabei kommt es zu minimalen Änderungen in der

Zusammensetzung der Lösungskonzentration, welche im Schwankungsbereich der Anmischlösung liegt. Gleichzeitig wird auch Sättigung an Anhydrit erreicht.

Ist im Steinsalzgrus auch Polyhalit enthalten, wird dieser bis zum Erreichen seiner Sättigungskonzentration, je nach Lösungskontakt und Lösegeschwindigkeit, angelöst oder aufgelöst. Ein Anteil von 10% Polyhalit im Steinsalz-Zuschlag neben Halit führt bei vollständigem Kontakt mit der Anmischlösung (Tab. 3, rechte Spalte) entsprechend der A1-Rezepturanteile mit 25% Anmischlösung und 63,7% Steinsalz-Zuschlag (unter Vernachlässigung der einsetzenden Abbindereaktion von 11% MgO) zu geringen Änderungen in den Ionenkonzentrationen der Anmischlösung. Dabei bleiben die  $Mg^{2+}$ -,  $Ca^{2+}$ - und  $Cl^-$ -Konzentrationen im Rahmen der Schwankungsbreite der Anmischlösung. Lediglich der  $Na^+$ -,  $K^+$ - und  $SO_4^{2-}$ -Gehalt erhöht sich etwas (Tab. 4). Die Lösung erreicht damit Sättigung auch an Polyhalit, Carnallit und Kainit neben Halit und Anhydrit. Von 10% Polyhalit im Salzzuschlag haben sich dabei 3-4% gelöst und gleichzeitig haben sich zwischen 1-3% Anhydrit, Carnallit und Kainit in Summe neu gebildet.

Tab. 4: Vergleich Zusammensetzung Anmischlösung nach Kontakt mit Steinsalzgrus a) aus 100% Halit und b) aus 90% Halit und 10% Polyhalit (thermodynamisches Berechnungsergebnis /5/).

Ionenkonzentrationen	$Na^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$
	molal [mol/kg H <sub>2</sub> O]					
Anmischlösung (entspr. Tab. 2, rechte Spalte)	0,10	0,03	5,44	0,001	10,49	0,261
a) nach Kontakt mit 100% Halit = <i>Salzzuschlag</i> (entspr. A1-Rezeptur)	0,14	0,03	5,44	0,0003	10,53	0,260
b) nach Kontakt mit 90% Halit und 10% Polyhalit = <i>Salzzuschlag</i> (entspr. A1-Rezeptur)	0,19	0,08	5,27	0,0003	9,89	0,461

Ein entsprechender Anteil an Polyhalit im Steinsalzgrus bewirkt letztendlich eine Verdopplung der geringen Sulfationen-Konzentration in der Anmischlösung. Dabei lösen sich entsprechend der A1-Rezeptur maximal 3-4% von vorhandenem Polyhalit im Zuschlag.

Inwieweit ein vorhandener Sulfatgehalt in der Anmischlösung überhaupt die Abbindereaktion des MgO entsprechend Gl. 1 und 2 beeinflussen kann, wird seit einigen Jahren am Institut für Anorganische Chemie der TU BAF untersucht.

Bereits aus der Literatur, u.a. /6-9/, ist bekannt, dass MgO auch in Gegenwart von MgSO<sub>4</sub>-Lösung abbilden kann und entsprechende basische Magnesiumsulfat-Hydrate (Bindemittelphasen) ausbildet:



Im Ergebnis der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass kein Einbau von Sulfat-Ionen unter Veränderung der Phaseigenschaften der basischen Magnesiumchlorid-Hydrate, wie beispielsweise in die 3-1-8 Phase stattfindet. Stattdessen bilden sich ausschließlich eigenständige Phasen der Zusammensetzung: 3Mg(OH)<sub>2</sub>·MgSO<sub>4</sub>·8H<sub>2</sub>O (3-1-8 Sulfatphase) und 5Mg(OH)<sub>2</sub>·MgSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O (5-1-2 Sulfatphase). Erstere bildet sich kinetisch kontrolliert im Raumtemperaturbereich, letztere stellt die thermodynamisch stabile Gleichgewichtsphase im Lösungs-Feststoff-System (Mg(OH)<sub>2</sub>-MgSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O) bis über 100°C dar /10/. Deren Existenzbereich ist neben der chloridischen 3-1-8 Phase in Abb. 2 für das quaternäre System Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, OH -H<sub>2</sub>O bei 25°C gezeigt /11/.

Die 5-1-2-Sulfat-Phase bildet sich nur in Gegenwart von MgSO<sub>4</sub>-Lösungen, die einen Chlorid-Gehalt unter 2,5 mol MgCl<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>O aufweisen. Bei höheren MgCl<sub>2</sub>-Konzentrationen entsteht ausschließlich die chloridische Bindemittelphase (3-1-8 Phase).

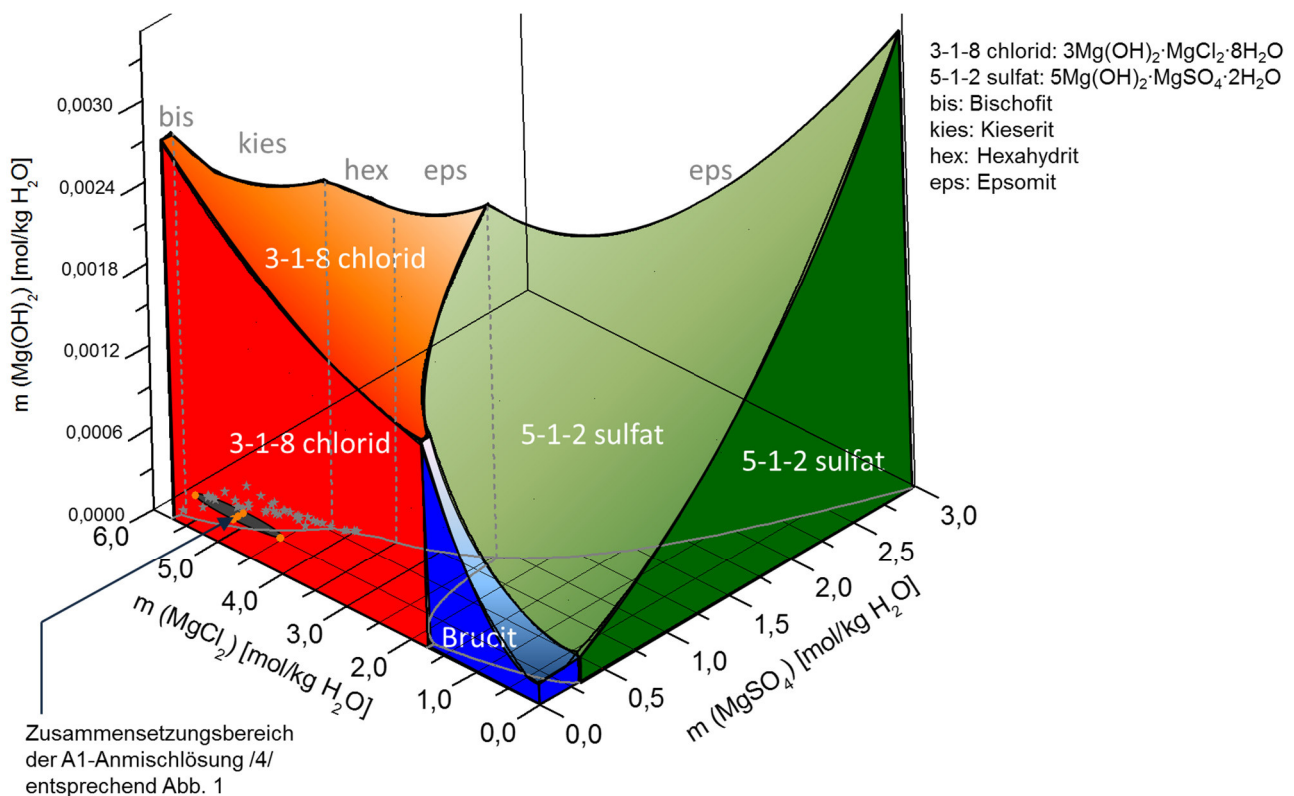


Abb.2: Phasenexistenzgebiete im System Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, OH - H<sub>2</sub>O bei 25°C /11/ mit Einordnung der A1-Anmischlösungszusammensetzung /4/.



Für die Bewertung, ob Polyhalit im Steinsalzgrus eine Auswirkung auf die Bindemittelphasenbildung hat, wurden Modellparameter nach Anpassung an die experimentell bestimmten Löslichkeitsdaten bei 25°C im System Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, OH - H<sub>2</sub>O /11/, im System Na, Mg, Cl, OH - H<sub>2</sub>O /2, 10/ sowie den ternären Systemen Mg(OH)<sub>2</sub>-MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O /2, 10, 12/ und Mg(OH)<sub>2</sub>-MgSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O /2, 10/ in die thermodynamische Datenbasis /5/ implementiert, um die Bindemittelphasenbildung im hexären System der ozeanischen Salze berechnen zu können.

Folgendes Ergebnis wurde erhalten:

Bei der Verarbeitung der A1-Rezeptur (AnmischlÖsungskonzentration /4/, Tab. 2, rechte Spalte), in welcher der Steinsalzgrus aus 100% Halit besteht, entsteht nach abgeschlossener Abbindereaktion ausschließlich die chloridische 3-1-8 Bindemittelphase. Im 1-2%-Bereich kristallisiert Bischofit, Halit, Carnallit und Anhydrit (theoretisch auch Kieserit, dessen Kristallisation ist jedoch kinetisch gehemmt und daher nicht zu beobachten) im Porenraum des Baustoffgefüges aus (Tab. 5).

Ist 10% Polyhalit neben Halit im Zuschlag enthalten, bildet sich ebenfalls und ausschließlich die chloridische 3-1-8 Bindemittelphase. Anteilig, und zwar 3-4% Polyhalit aus dem Steinsalzgrus lösen sich. Infolge dessen kristallisiert anstelle von Bischofit nun ca. 1% Carnallit im Porenraum aus. Minimal steigt auch die Anhydrit-Auskristallisation auf 0,4% (Tab. 5). Das sind die ausschließlichen Effekte, die ein Polyhalitanteil von 10% im Steinsalzzuschlag bewirkt. Dabei handelt es sich um keine Effekte, die die Eigenschaften des Baustoffs verändern.

Tab. 5: Phasenbestand des A1-Baustoffs nach abgeschlossener Abbindereaktion, ohne und mit 10% Polyhalit im Steinsalzgrus (Berechnungsergebnis infolge Gleichgewichtseinstellung /13/).

Rezeptur A1	A1-Sorelbaustoff, Gefügebestand nach abgeschlossenen Abbindereaktion, bei einem	
	Steinsalzgrus aus 100% Halit	Steinsalzgrus aus 90% Halit und 10% Polyhalit
11,3% MgO	32 % 3-1-8 Bindemittelphase	32 % 3-1-8 Bindemittelphase
25% AnmischlÖsung (Konz. Tab. 2 rechte Spalte)	66 % Halit	59 % Halit
	0,8 % Bischofit	6,3 % Polyhalit
	0,6 % Kieserit	1,0 % Kieserit
	0,1 % Carnallit	1,0 % Carnallit
	0,002% Anhydrit	0,4 % Anhydrit
63,7% Steinsalz		

Auch höhere Anteile an Polyhalit im Steinsalzgrus würden keine weiteren Veränderungen bewirken, da dieser als Gleichgewichtsphase (inert) erhalten bleibt und keine höheren Sulfat-Ionenkonzentration hervorruft, die zu einer veränderten Bindemittelphasenbildung führen könnten.

Werden die thermodynamischen Berechnungen dagegen so angesetzt, dass die Bildung der Sulfat-Sorelphase neben der chloridischen Sorelphase erzwungen wird, müssen beispielsweise Sulfat-Ionenkonzentration von  $> 1 \text{ mol/kg H}_2\text{O}$  bei entsprechend hohen  $\text{MgCl}_2$ -Konzentrationen von 4-4,5 molal vorliegen. Das Verhältnis der molalen Lösungskonzentrationen von  $\text{MgCl}_2$  zu  $\text{MgSO}_4$  muss im Bereich von 3-5 liegen, damit eine Bildung der Sulfat-Sorelphase neben der Chlorid-Sorelphase einsetzt, wodurch die Baustoffeigenschaftsentwicklung beeinflusst werden könnte.

Liegen die Verhältnisse der molalen Lösungskonzentrationen von  $\text{MgCl}_2$  zu  $\text{MgSO}_4$  dagegen im Bereich von 10-20 (bei 20, wenn kein Polyhalit im Steinsalzgrus enthalten ist und bei 10 ab einem Gehalt von 3-4 % Polyhalit), wird ausschließlich die chloridische Bindemittelphase gebildet.

Neben Polyhalit stellen auch Anhydrit, Carnallit und Kieserit Gleichgewichtsphasen im Rahmen der A1-Rezeptur, wie Tab. 4 zeigt, dar. Sind davon Anteile im Steinsalzgrus enthalten, so bewirken diese keine Veränderungen bei der Ausbildung der Bindemittelphase. Sie stellen wie Halit und Polyhalit inerte Zuschlagskomponenten dar.

Unter dem Gesichtspunkt der über viele Jahre referenzierten A1-Rezeptur und daran aufgezeigten und dokumentierten Eigenschaften ist jedoch zu empfehlen den bisher ausgewiesenen Halit-Anteil im Steinsalzzuschlag nicht wesentlich zu unterschreiten (sollte wenigstens bei 90% liegen), um beispielsweise geomechanische Parameter, welche durch den Halit-Zuschlag eventuell anteilig bestimmt werden, nicht zu verändern. Im Fall von Carnallit als möglicher Nebenbestandteil sollte darüber hinaus aus verarbeitungstechnischen Gründen nur ein möglichst minimaler Gehalt (Empfehlung:  $< 3\%$ ) im Zuschlag enthalten sein. Carnallit hat die Eigenschaft an der Luft je nach deren Feuchtegehalt zu zerfließen. Die entstehende Lösung führt beispielsweise zu Verklumpung der Vormischung aus  $\text{MgO}$  und Steinsalzgrus (Vorprodukt A1).

## **Zusammenfassung**

Ein Polyhalit-Anteil im Steinsalzgrus der A1-Rezeptur hat aus geochemischer Sicht keinen Einfluss auf die Baustoffeigenschaften, da es zu keiner Beeinflussung der Bindemittelphasenbildung kommt. Die Charakteristik der Bindemittelphase(n) und deren Bildungskinetik ist verantwortlich für die Eigenschaftsentwicklung des Baustoffs, woraus nach vollständig abgelaufener Abbindereaktion signifikante chemo-mechanische Eigenschaften für eine Sorelbaustoff-Rezeptur resultieren.

Die Bildung der chloridischen Bindemittelphase(n) im A1-Sorelbaustoff kann in Bezug auf die Rezepturkomponenten lediglich durch einen erhöhten Sulfatgehalt in der Anmischlösung bewirkt werden. Die dazu notwendigen Sulfatgehalte werden jedoch nicht durch die Anwesenheit von Polyhalit (oder Kieserit oder Anhydrit) als möglicher Sulfatlieferant erreicht.

Für die A1-Rezeptur, mit ihren dokumentierten Eigenschaften (u.a. Verarbeitung, Frischbetoneigenschaften und mechanische Parameter im abgebundenen Zustand), sollte an der ausgewiesenen Zusammensetzung des Steinsalz-Zuschlages jedoch festgehalten werden, was heißt, dass dieser wenigstens zu 90% aus Halit bestehen sollte. Innerhalb der restlichen 10% können Anteile von Polyhalit, Anhydrit und Kieserit liegen. Im Fall von Carnallit als möglicher Nebenbestandteil sollte aus verarbeitungstechnischen Gründen nur ein möglichst minimaler Gehalt (< 3%) im Rahmen der 10% Nebenbestandteile zugelassen werden.

### Referenzen:

- /1/ Exkursionsführer Zechstein 87, Auszug: Zechstein 2-4 des Salzstocks Gorleben, D. Bornemann & R. Fischbeck, 1987.
- /2/ D. Freyer, M. Gruner, T. Popp "Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs." Freiberg. Forschungsh. E15 – Naturwissenschaften, 1. Auflage, 2015, Verlag der TU Bergakademie Freiberg, ISBN 978-386012-516-8.
- /3/ DBE TEC (J. Engelhardt) "Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften". Stand 15.12.2008
- /4/ Analysendaten des Asse GmbH-Labors zur Zusammensetzung der im Zeitraum 2010 – 2016 eingesetzten A1-Anmischlösung. Die Daten wurden per E-Mail am 17.10.2016 über BfS zur Verfügung gestellt.
- /5/ Thermodynamische Referenz-Datenbasis (THEREDA), www.thereda.de, 1. Release: System Na, K, Mg, Ca - Cl, SO<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>O (l) (polytherm), THEREDA\_PIT\_CAPP\_r01.dat, 2013-07-04.
- /6/ F. Kahler „Zur Kenntnis des Bildungsmechanismus des Magnesiumoxydsulfatzementes“ Radex R. 5(6) (1948), S. 102 – 106.
- /7/ T. Demediuk, W.F. Cole „A Study on Magnesium Oxysulphates.“ Austr. J. Chem. 10 (1957), S. 287 - 294.
- /8/ L. Urwongse, C. A. Sorrell „Phase Relations in Magnesium Oxysulfate Cements.“ J. Am. Ceram. Soc. 63(9-10) (1980), S. 523 - 526.
- /9/ R. E. Dinnebier, M. Pannach, D. Freyer "3Mg(OH)<sub>2</sub>·MgSO<sub>4</sub>·8H<sub>2</sub>O: A Metastable Phase in the System Mg(OH)<sub>2</sub>-MgSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O." Z. Anorg. Allg. Chem. 639(10) (2013), S. 1827 - 1833.

- /10/ M. Pannach "Zur Phasenbildung und -stabilität basischer Magnesiumchlorid- und Magnesiumsulfat-Hydrate im Temperaturbereich von 25°C bis 120°C." Dissertation TU Bergakademie Freiberg, 2017.
- /11/ I. Paschke "Untersuchungen zur Phasenbildung in Sorel-basierten Systemen." Dissertation TU Bergakademie Freiberg, 2017.
- /12/ M. Pannach, S. Bette, D. Freyer "Solubility Equilibria in the System  $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  from 298 K to 393 K." J. Chem. Eng. Data, DOI: 10.1021/acs.jced.6b00928, Publication Date (Web): March 23, 2017.
- /13/ Thermodynamische Referenz-Datenbasis (THEREDA), [www.thereda.de](http://www.thereda.de), 1. Release: System Na, K, Mg, Ca - Cl,  $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_{(l)}$  (polytherm), THEREDA\_PIT\_CAPP\_r01.dat, 2013-07-04, mit implementierten Modellparametern aus Anpassungen an Löslichkeitsdaten in den ternären Systemen  $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  /2, 10, 12/ und  $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-MgSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  /2, 10/ sowie im System Mg, Cl,  $\text{SO}_4$ , OH -  $\text{H}_2\text{O}$  /11/ und im System Na, Mg, Cl, OH -  $\text{H}_2\text{O}$  /2, 10/.